УДК 621.313

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕМПФИРОВАННЫХ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

С.И. Качин, Ю.С. Боровиков

Томский политехнический университет
E-mail: borovikov@tpu.ru

Рассматривается возможность выбора оптимальной конструкции демпфированной обмотки якоря в зависимости от предполагаемых условий коммутации секций электрической машины. Показано проявление наибольшей эффективности демпфированных обмоток в режиме слабой недокоммутации, что позволяет рекомендовать настройку работы данных электрических машин именно в этом режиме.

Как отмечалось в ряде работ [1, 2], демпфированные обмотки якоря коллекторной электрической машины могут иметь большое число вариантов их выполнения, что обусловлено различными возможными соотношениями таких параметров, как число катушек в секциях, их взаимное пространственное расположение в пазах якоря, а также распределение витков секций по составляющим их катушкам. Число сочетаний указанных параметров в машинах малой мощности, имеющих, как правило, многовитковые секции, может составлять сотни вариантов, что существенно осложняет процесс выбора того или иного типа демпфированной обмотки и конкретных обмоточных данных для избранного вида конструкции обмотки. Поэтому целесообразно знать основные коммутационные возможности различных типов демпфированных обмоток, а также предпочтительное распределение витков по катушкам секции для того или иного типа обмотки [3].

С этой целью следует оценить влияние типа обмотки и соотношения между витками в катушках секций на коммутирующие свойства обмоток и на основании данного анализа выявить область оптимальных параметров обмоток для заданных условий их эксплуатации.

В качестве критерия коммутирующих свойств обмоток может быть использована величина энергии, выделяющейся в искровых разрядах под щеткой на завершающей стадии процесса коммутации. Энергия искровых разрядов рекомендована рядом исследователей в качестве критерия коммутационной напряженности электрической машины в связи с тем, что данный показатель связан с величиной электроэрозионного износа контактных элементов [4].

При исследовании коммутирующих свойств демпфированных обмоток представляет интерес как суммарное выделение энергии искрения всех секций паза, так и соотношение между энергиями искрения отдельных секций паза, которое в идеальном случае должно быть равномерным (с точки зрения одинакового электроэрозионного изнашивания коллекторных пластин). В случае, если электроэрозионная составляющая изнашивания коллекторных пластин превышает фрикционную составляющую, то с течением времени возможно изменение профиля рабочей дорожки скольжения вследствие неравномерного выделения энергии в искровых разрядах на разных коллекторных пластинах. Это может еще больше усилить неравномерность выделения энергии, что приводит к недопустимо высокому уровню искрения под щетками и выходу электрической машины из строя [5, 6].

Оценка энергии в искровых разрядах под щеткой может быть произведена с помощью решения системы дифференциальных уравнений коммутации магнитосвязанных секций численными методами на обеих стадиях коммутационного процесса (на этапе замыкания секций щеткой и во время протекания электроискрового процесса). Однако в этом случае затруднен анализ влияния различного рода факторов на коммутационный процесс вследствие большого объема вычислений.

Наиболее целесообразно воспользоваться приближенными аналитическими выражениями, полученными в [7, 8] для выявления основных закономерностей изучаемого явления и предварительной оценки коммутирующих свойств различных типов конструкций демпфированных обмоток якоря, после чего может быть сделан выбор в пользу той или иной конструкции, определена область ее наиболее вероятных оптимальных значений параметров, и затем осуществлены дополнительные уточняющие исследования с помощью более точной математической модели [9].

Анализ коммутирующих свойств вариантов обмоток якоря производится на основе энергии единичного искрового разряда i-ой секции, определяемого по выражению

$$W_i = L_{si}\frac{i_{pi}^2}{2}.$$

Для предварительной оценки величины W_i могут быть использованы зависимости для расчета тока разрыва i_p и для определения коэффициента демпфирования G [8]. При этом требуется знать величины средних коммутирующих ЭДС для одновременно коммутируемых секций якоря. Указанные параметры могут быть получены расчетным или экспериментальным путями.

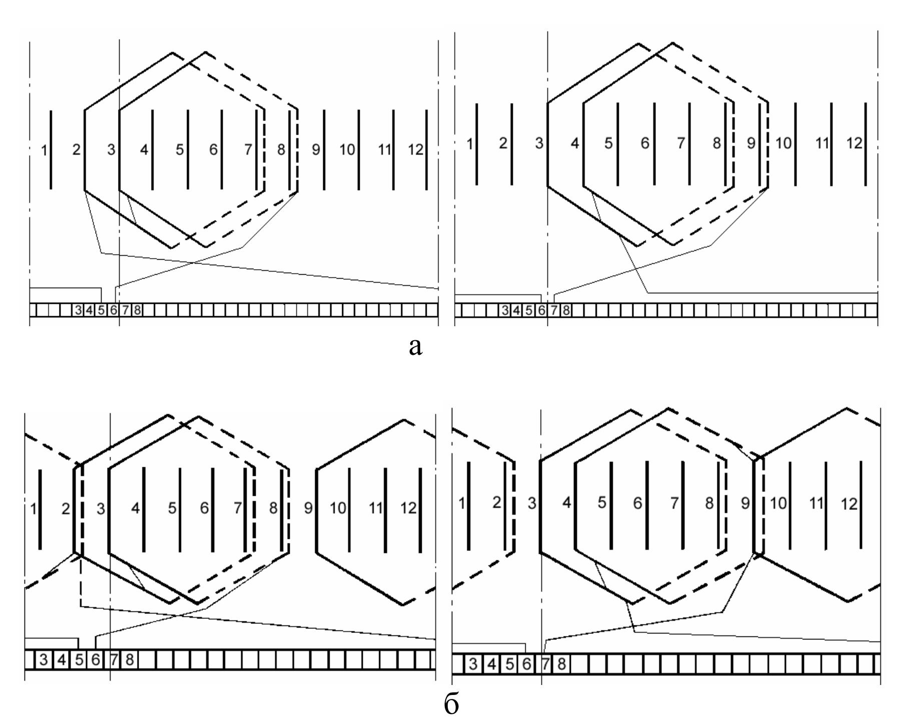


Рис. 1. *Варианты исполнения демпфированных обмоток якоря: а) тип I; б) тип II*

В качестве примера осуществим анализ коммутирующих свойств двух типов обмоток, приведенных на рис. 1.

Поскольку в указанных конструкциях обмоток уже определено количество катушек в секциях и их расположение в пазах якоря, то основными варьируемыми параметрами являются щеточное перекрытие ($\beta_щ$) и соотношение чисел витков в основных катушках секций паза якоря и их дополнительных катушках. Поскольку влияние $\beta_щ$ на коммутирующие свойства демпфированных обмоток не является преобладающим, то вопросы оптимизации этого параметра подробно в данной статье не рассматриваются. Следует иметь в виду, что $\beta_щ$ должно быть больше единицы и обеспечивать перекрытие ламелей одновременно коммутируемых секций на протяжении максимально возможного времени горения дуги под щеткой для обеспечения эффекта демпфирования. В ходе дальнейшего анализа $\beta_щ$ принималось равным 1,8.

Соотношение чисел витков в основных и дополнительных катушках секций демпфированных обмоток якоря влияет на величины индуктивностей и взаимных индуктивностей между соседними в порядке коммутации контурами.

Для обмотки на рис. 1, *а*, данные параметры связаны с числом витков в дополнительной катушке (при допущении отсутствия магнитной связи между катушками, лежащими в разных пазах якоря) следующими выражениями

$$L_s = L_{s.\delta}(w_s^2 - 2w_s w_2 + 2w_2^2);$$

$$M_{12} = k_{M12} L_{s.\delta}(w_s - w_2)^2 / w_s^2;$$

$$M_{21} = 2k_{M21} L_{s.\delta}(w_s - w_2) w_2 / w_s^2,$$

где w_2 – число витков в дополнительной катушке (катушки в пазах 2, 7 и 4, 9 на рис. 1, *а*); w_s – число витков в секции; $L_{s,\delta}$ – индуктивность однокатушечной секции; M_{12} – взаимная индуктивность между первой и второй секциями рассматриваемого паза; M_{21} – взаимная индуктивность между второй секцией рассматриваемого паза и первой секцией следующего (в порядке коммутации) паза; k_{M12}, k_{M21} – коэффициенты магнитной связи между катушками различных секций, лежащими в одних пазах (в расчетах принято k_{M12}=k_{M21}=0,9).

Аналогичные выражения для симметричного варианта обмотки на рис. 1, *б*, имеют вид

$$L_s = L_{s.\delta}(w_s^2 - w_s w_2 + 2w_2^2);$$

$$M_{12} = k_{M12} L_{s.\delta}(w_s^2 - w_s w_2) / 2w_s^2;$$

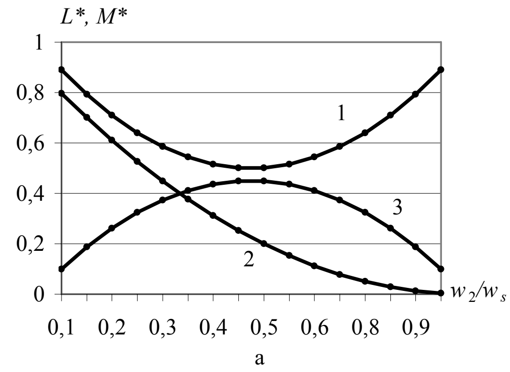
$$M_{21} = k_{M21} L_{s.\delta}(w_s^2 + 2w_s w_2 - 3w_2^2) / 4w_s^2.$$

Диаграммы изменения L_s, M_{12}, M_{21} от отношения w_2/w_s для рассматриваемых конструкций обмоток представлены на рис. 2. Для обмотки на рис. 1 характерно достижение минимума L_s и максимума M_{21} при $w_2 \approx 0{,}5 w_s$ (рис. 2, *а*). Величина M_{12} в этой обмотке снижается с увеличением w_2 (при w_s=const).

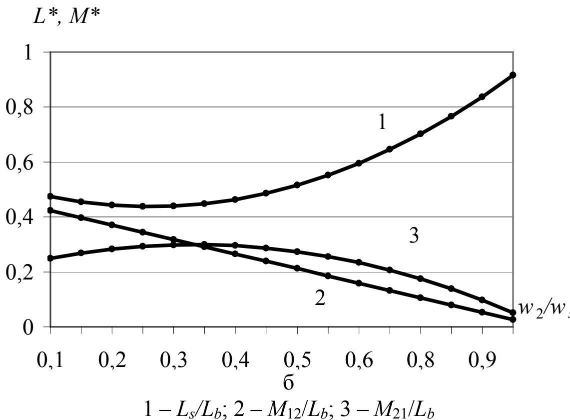
В обмотке на рис. 1, *б*, значение параметра M_{12} также снижается с повышением w_2 (рис. 2, *б*). Однако величина L_s имеет минимум при $w_2 \approx 0{,}235 w_s$, а у M_{21} наблюдается максимум при w_2=0,353w_s.

В общем случае тип обмотки оказывает влияние на коммутационный процесс и на стадии замыкания коммутируемых секций щеткой, что сопровождается изменением тока разрыва [7]. О свойствах рассматриваемых обмоток в этом случае дают представление диаграммы на рис. 3, которые полу-

чены для коммутирующих ЭДС первой и второй секций паза $e_{к1}=e_{к2}=0,4$ В, что соответствует работе базовой обмотки на нижней границе области безыскровой работы.



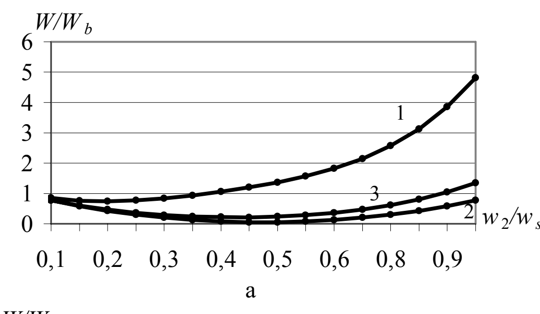
а



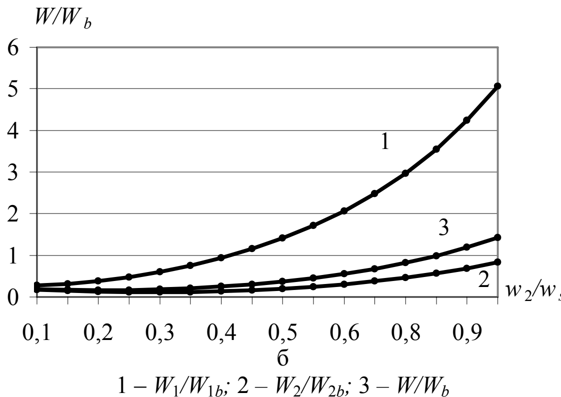
б

1 – L_s/L_b; 2 – M_{12}/L_b; 3 – M_{21}/L_b

Рис. 2. *Диаграммы изменения L_s, M_{12}, M_{21} в зависимости от соотношения w_2/w_s: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II*



а



б

1 – W_1/W_{1b}; 2 – W_2/W_{2b}; 3 – W/W_b

Рис. 3. *Диаграммы при коммутирующих ЭДС первой и второй секций паза $e_{к1}=e_{к2}=0,4$ В: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II*

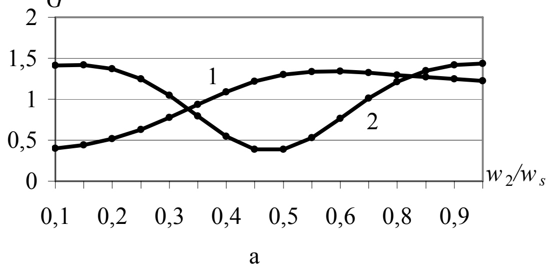
Из приведенных графиков видно, что суммарная энергия искрения обмотки по типу I (рис. 3, *а*) снижается более чем в 4,6 раза при $w_2=0,471w_s$. У второй обмотки данный показатель уменьшен в 6,2 раза в сравнении с базовым уровнем при $w_2=0,176$ (рис. 3, *б*).

Следовательно, исследуемые обмотки положительно влияют на уменьшение тока разрыва, что позволяет дополнительно снижать энергию искровых разрядов секций паза.

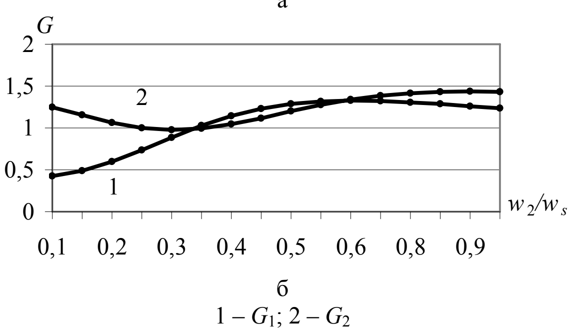
По-иному проявляются коммутирующие свойства исследуемых типов обмоток при работе с перекоммутацией в условиях распределения коммутирующих ЭДС в секциях паза, характерного для машин без дополнительных полюсов со сдвигом щеток против направления вращения (рис. 4–6).

В этом случае коэффициенты демпфирования могут превышать единичное значение (рис. 4), что свидетельствует о поступлении дополнительной энергии в коммутируемый контур за время искрового разряда, а отношение W_{1b}/W_{2b} в базовом варианте близко к единице, что обусловлено меньшей величиной $e_{к2}$ по сравнению с $e_{к1}$. В первой демпфированной обмотке равномерное распределение энергий искрения по секциям паза наблюдается при $w_2\approx0,353w_s$ и при $w_2=0,529$ (рис. 5, *а*).

При этом энергии искрения обеих секций паза снижаются ориентировочно в 2 и более раз (рис. 6, *а*). Суммарная энергия снижается до $0,437W_\delta$ (W_δ – суммарная энергия искрового разряд для базового варианта обмотки) при $w_2\approx0,353w_s$ и до $0,297W_\delta$ при $w_2=0,529$. Величина числа витков дополнительной обмотки, равная $0,529w_s$ является в данном случае предпочтительной, поскольку при этом достигается наибольшее снижение энергий искрения секций паза.



а



б

1 – G_1; 2 – G_2

Рис. 4. *Диаграммы изменения коэффициентов демпфирования для первой секции паза (G_1) и второй секции паза (G_2) при варьировании w_2: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II*

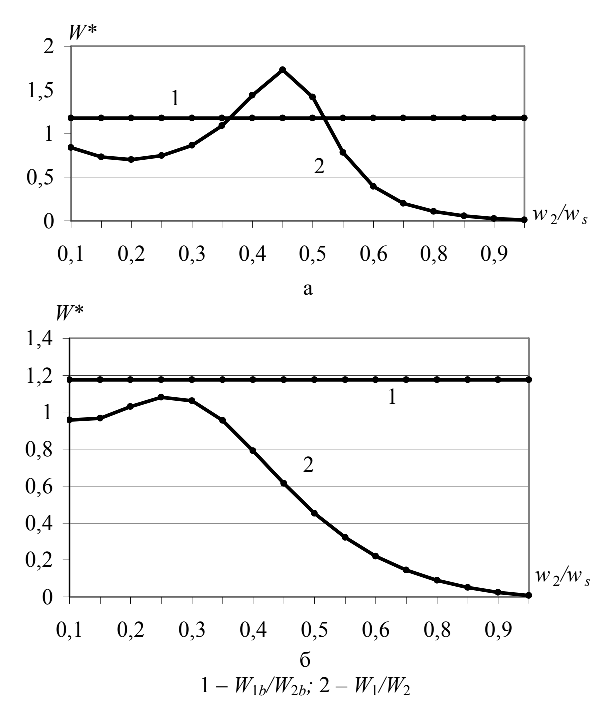


Рис. 5. *Диаграммы изменения отношения энергий искрового разряд первой секции паза и второй секции паза для базового (W_{1b}/W_{2b}) и демпфированного (W_1/W_2) вариантов обмоток при варьировании w_2: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II*

Во втором варианте демпфированной обмотки лучшие результаты достигаются при w_2=0,176w_s, когда выравниваются энергии искрения секций паза (рис. 5, *б*) и суммарная энергия искрения паза снижается до 0,339W_δ (рис. 6, *б*), что почти совпадает с ее минимальной величиной, равной 0,337W_δ при w_2=0,118w_s. Однако данные показатели несколько хуже, чем у первого варианта демпфированной обмотки.

Следовательно, первый вариант демпфированной обмотки лучше работает в области перекоммутации, а второй вариант демпфированной обмотки показывает лучшие результаты в области недокоммутации. Причем в области перекоммутации коммутирующие свойства повышаются по мере увеличения уровня перекоммутации, а в области недокоммутации наблюдается обратная картина.

Выводы

Таким образом, исследуемые типы демпфированных обмоток по-разному работают при недокоммутации и перекоммутации, что позволяет сделать первоначальный выбор конструкции в зависимости от предполагаемых условий коммутации секций электрической машины.

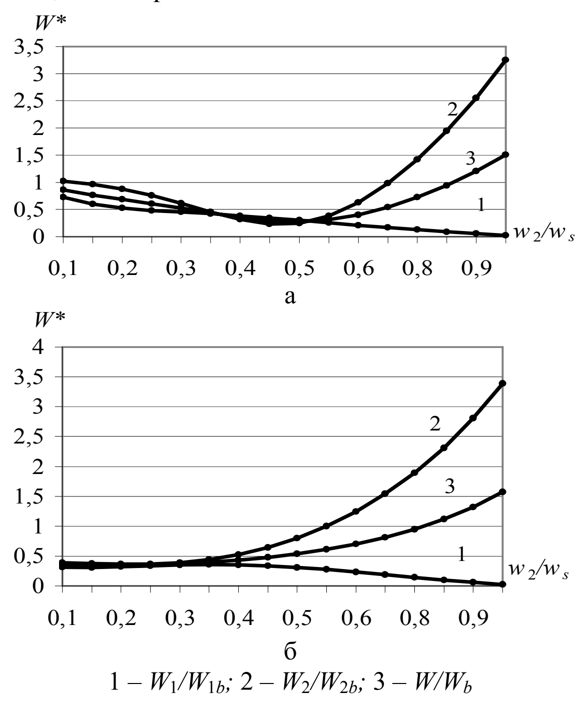


Рис. 6. *Диаграммы изменения отношения энергий искрового разряд базового и демпфированного вариантов обмоток при варьировании w_2: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II*

Каждая из рассмотренных демпфированных обмоток имеет свою характерную область параметра w_2, в которой достигается выравнивание энергий искрения по секциям паза при снижении суммарной энергии искрения. Поэтому в каждом конкретном случае следует искать оптимальное значение числа витков дополнительной обмотки именно в этих областях. При этом максимальная энергия искрения секций может снижаться до десяти и более раз, а также уменьшаться суммарная энергия искрения в аналогичных пределах.

Наибольшая эффективность демпфированных обмоток проявляется в режиме слабой недокоммутации, что позволяет рекомендовать настройку работы электрических машин с демпфированными обмотками именно в этом режиме.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом с Федеральным агентством по науке и инновациям РФ № 02.442.11.7267 от 28.02.2006 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
2. Качин С.И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности: Дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 2002. – 438 с.
3. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. – 1997. – № 6. – С. 28–32.
4. Толкунов В.П., Карпенко Ф.Т., Белошенко В.И., Осетрова З.М. Энергетический критерий коммутации машин постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. – 1974. – № 7. – С. 720–723.
5. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С. Повышение ресурсных характеристик скользящего контакта коллекторных машин электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 42–47.
6. Trutt F.C., Sottile J.K., Kohler J.L. Detection of AC Machine Winding Deterioration Using Electrically Excited Vibratons // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – V. 37. – № 1. – P. 10–14.
7. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Клыжко Е.Н. Коммутирующие свойства обмоток якорей коллекторных машин электроприводов на начальном этапе коммутации // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 136–140.
8. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Саблуков В.Ю., Клыжко Е.Н. Анализ коммутирующих свойств обмоток якорей электроприводов на завершающей стадии процесса коммутации // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 103–106.
9. Боровиков Ю.С. Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2003. – 155 с.

УДК 519.71:622.276